

PEMODELAN POLA ARUS BAROTROPIK MUSIMAN 3 DIMENSI (3D) UNTUK MENSIMULASIKAN FENOMENA UPWELLING DI PERAIRAN INDONESIA

Eva Mustikasari¹⁾, Lestari Cendikia Dewi¹⁾, Aida Heriati¹⁾ & Widodo Setiyo Pranowo¹⁾

¹⁾Pusat Penelitian dan Pengembangan Sumber Daya Laut dan Pesisir, Balitbang-KP, KKP

Diterima tanggal: 10 Januari 2015; Diterima setelah perbaikan: 11 Mei 2015; Disetujui terbit tanggal 24 Juni 2015

ABSTRAK

Pemodelan arus barotropik musiman tiga dimensi dilakukan untuk mensimulasikan fenomena *upwelling* di Perairan Indonesia. Pemetaan *upwelling* berguna sebagai tahap awal dalam mengetahui daerah potensial penangkapan ikan. Model hidrodinamika yang digunakan dalam studi ini adalah *finite volume*. Skenario model berupa domain dalam sepuluh lapisan kolom air (*equidistant*) dengan pembangkit arus berupa angin dan pasang surut. Gaya coriolis dimasukkan dalam perhitungan karena model memiliki domain yang luas. Simulasi dilakukan untuk Januari, April, Agustus dan Oktober 2007. Pola arus tiga dimensi (u, v, w) dan elevasi setiap jam didapat sebagai keluaran. Komponen positif arus vertikal, w , dirata-ratakan sepanjang bulan per elemen kolom air, kemudian di-plot menjadi peta *upwelling*. Pola arus hasil simulasi dapat menggambarkan eksistensi *Halmahera Eddy*, *Mindanao Eddy*, *South Java Current*, *Coastal Kelvin Wave* (diduga) dan Arus Lintas Indonesia. Validasi yang baik ditunjukkan dengan galat *RMS* elevasi relatif rendah, pada dua stasiun *buoy* DART di wilayah studi, yaitu $5,8542 \times 10^{-2} \text{m} - 1,1735 \times 10^{-1} \text{m}$. *Upwelling* pada Musim Barat terjadi di Indonesia Timur (perairan Busur Banda, Laut Maluku, Laut Seram, Selat Ujung Pandang, Teluk Tomini, Teluk Tolo, Teluk Bone). *Upwelling* mulai muncul di selatan Jawa, sedangkan di Indonesia Timur menjadi berkurang pada Musim Peralihan I. Pada Musim Timur, *upwelling* mulai muncul dari selatan Jawa sampai barat Sumatera Barat dan menguat di Indonesia Timur. Pada Musim Peralihan II, *upwelling* meluas ke arah barat sampai perairan Pulau Simeuleu, sedangkan di Indonesia Timur berkurang dibandingkan Musim Timur.

Kata kunci: Model Hidrodinamika 3D, Arus Barotropik, *Upwelling*, Perairan Indonesia.

ABSTRACT

A three-dimensional barotropic current modeling is employed to simulate the seasonal upwelling phenomenon in Indonesian seas which is important to the fisheries activity. The model is setup using finite volume as basis function to compute hydrodynamics in a water column which is constructed as ten equidistants sigma layer. 3D velocity and sea level dynamics are simulated for January, April, August and October 2007 using tidal and wind forcing. Coriolis parameter is taken into account since it has large model domain. Upwelling map is derived from average monthly per water column element of positive vertical current component (w). Result shows the presence of Halmahera Eddy, Mindanao Eddy, South Java Current, Coastal Kelvin Wave (suspected) and Indonesian Through-Flow. It has a good validation in sea level time series using DART mooring buoy (RMS error $5.8542 \times 10^{-2} \text{m} - 1.1735 \times 10^{-1} \text{m}$). The west monsoon (January) upwelling is founded in western part of Indonesia (Banda-arc Sea, Maluku Sea, Seram Sea, Makassar Strait, Tomini Bay, Tolo bay, Bone bay). In transition season I (April), upwelling is started to reveal in South Java Sea, while the upwelling intensity in the eastern part of Indonesia is decreasing. During east monsoon (August), a large field and high intensity of coastal upwelling occur in along southern part of Java until western part of Sumatera. Those upwelling field is continue widening to western part of Simeuleu island during the transition II season (October), while in eastern part of Indonesia the upwelling field is decreasing during this season.

Keywords: 3D hydrodynamic model, barotropic current, seasonal upwelling, Indonesian seas.

PENDAHULUAN

Upwelling adalah pergerakan massa air ke atas permukaan laut yang banyak membawa unsur hara dan memiliki tingkat kesuburan primer yang tinggi. Wilayah perairan laut yang terjadi *upwelling* merupakan *fishing ground* yang sangat potensial karena kaya akan zat-zat hara dan nutrien (Ihsan, 2013). Daerah tempat *upwelling* terjadi biasanya akan membawa massa air yang suhunya lebih rendah, juga membawa zat hara sehingga kesuburan perairan tersebut akan meningkat. Kesuburan suatu perairan diharapkan akan meningkatkan kelimpahan sumber daya hayati perairan tersebut. Pengetahuan tentang lokasi perairan dengan fenomena tersebut akan dapat membantu para nelayan untuk mencari lokasi daerah penangkapan ikan (Simbolon & Tadjuddin, 2008).

Korespondensi Penulis:

Jl. Pasir Putih I Ancol Timur, Jakarta Utara 14430. Email: eva.mustikasari@gmail.com

Sunarto (2008) menyatakan bahwa unsur hara yang terbawa dari dasar perairan karena proses *upwelling* menjadi sumber nutrisi bagi produsen primer di laut yang merupakan sumber energi bagi seluruh konsumen di rantai makanan dalam proses produksi di laut. *Upwelling* biasanya berada di kisaran kedalaman perairan 200-300 m (Bowden & Ferguson, 1980), sedangkan Cole & McGlade (1998) menyatakan bahwa *upwelling* dapat pula terjadi di perairan yang lebih dangkal dengan kedalaman 20-40 m. Bowden (1983) menyatakan variasi musiman *upwelling* terjadi berhubungan dengan kekuatan angin. Kemili (2012) juga melakukan penelitian terhadap hubungan fenomena *upwelling* dan kesuburan wilayah sekitarnya, yaitu dalam hasil penelitiannya dilaporkan bahwa selatan Jawa Timur dan Laut Banda memiliki durasi *upwelling* yang lebih panjang (3-4 bulan) dan intensitas

yang lebih tinggi (anomali SST mencapai $>-2^{\circ}\text{C}$ dibawah rata-rata) menghasilkan produktivitas primer yang tinggi pula dibandingkan daerah sekitarnya.

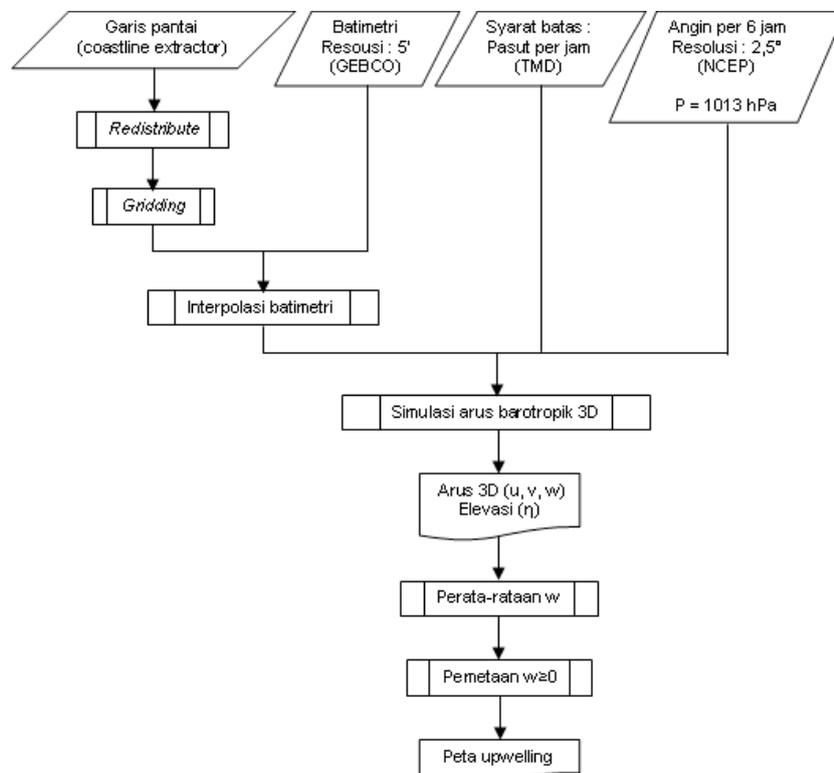
Kajian mengenai *upwelling* sangat menarik untuk dilakukan mengingat fenomena ini menciptakan suatu kondisi yang menguntungkan bagi kegiatan perikanan di Indonesia, seperti penelitian Kunarso (2005) yang melakukan *overlay* terhadap peta distribusi tuna dan lokasi *upwelling* sehingga menghasilkan *fishing ground* tuna yang potensial berdasarkan variasi bulan dan tipe kejadian iklim (Normal, El Niño dan La Niña).

Lokasi pergerakan zona konvergensi sebagai area *fishing ground*, dapat dipetakan salah satunya dengan cara memodelkan dinamika arus vertikal. Model hidrodinamika 3-D menggunakan ROMS di selatan Benguela telah dilakukan oleh Penven *et al.* (2001) dengan resolusi yang tinggi di daerah pantai serta melakukan *couple* model hidrodinamika dan model biologi menggunakan pendekatan model nutrisi fitoplankton zooplankton untuk mensimulasikan produksi plankton serta telur dan larva. Liu (1995) menyimpulkan bahwa model yang simpel tidak dapat mensimulasikan dengan baik kecepatan dan percepatan dari kolom air, padahal kedua hal tersebut merupakan faktor penting dalam menentukan laju *upwelling*. Pada penelitian ini model hidrodinamika yang dibangun mengasumsikan bahwa arus bersifat

barotropik, artinya arus diasumsikan dibangkitkan oleh pasang surut (pasut) dan angin namun belum memperhatikan perbedaan temperatur dan densitas. Pemodelan arus tiga dimensi dibangun menggunakan metode *numeric finite volume*. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi bagi dunia pemodelan oseanografi khususnya pemodelan *upwelling* yang merupakan fenomena penting bagi dunia perikanan kita.

METODE PENELITIAN

Simulasi pemodelan dilakukan di wilayah Perairan Indonesia selama Januari, April, Agustus, dan Oktober 2007. Masing-masing bulan berturut-turut mewakili Musim Barat, Musim Peralihan I, Musim Timur dan Musim Peralihan II. Dalam penelitian ini, Perairan Indonesia merupakan objek pemetaan *upwelling*. Untuk memenuhi kebutuhan itu, pemodelan numerik ini mengambil domain (area pemodelan) lebih luas dari batas wilayah perairan Indonesia. Batas domain meliputi $84,43807^{\circ}\text{BT}$ - $145,6843^{\circ}\text{BT}$ dan $24,6095^{\circ}\text{LS}$ - $22,48639^{\circ}\text{LU}$ serta kedalaman perairan yang dibatasi oleh batimetri. Domain ini dibagi menjadi 10 lapisan dengan *equidistance system* koordinat sigma ($\sigma=0.1$ atau $1/10$). Lapisan ke 1 merupakan lapisan terdalam. Sedangkan, lapisan ke 10 merupakan lapisan terdangkal. Alur teknis pemodelan ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir teknis pemodelan pola arus barotropik 3D untuk mensimulasikan fenomena *upwelling*.

Pemodelan hidrodinamika ditempuh dengan pendekatan *numeric finite volume* (DHI, 2007). Asumsi yang dipakai adalah arus bersifat barotropik. Data batimetri diperoleh dari GEBCO (*General Bathymetric Chart of the Ocean*) dengan resolusi 5 menit. Data garis pantai diperoleh dari *Coastline Extractor*. Data pasang surut per jam diperoleh dari TMD atau *Tidal Model Driver* (Egbert & Erofeeva, 2002). Data angin per enam jam diperoleh dari NCEP (*National Center for Environmental Prediction*). *Reanalysis* data dengan resolusi 2,5 derajat (Kalnay et al., 1996). Tekanan udara di permukaan laut diasumsikan nilainya seragam sepanjang waktu simulasi, yaitu 1.013 hPa.

Pemodelan diawali dengan memasukkan batas tertutup, yaitu garis pantai seluruh pulau yang termasuk ke dalam domain model. Selanjutnya garis pantai ini di-*redistribute* untuk mengatur jarak titik-titik pembentuk garis pantai. Batas terbuka model dibuat di perairan terbuka sehingga domain telah menjadi sistem tertutup. Batas terbuka model ini juga perlu di-*redistribute*. Diagram alir teknis pemodelan diberikan oleh Gambar 1.

Setelah batas domain di permukaan terbentuk maka langkah selanjutnya adalah melakukan *gridding* berupa *unstructured mesh*. Grid berbentuk segitiga yang ukurannya berbeda-beda. Selanjutnya sepanjang batas terbuka dan sepanjang waktu simulasi di-*input* data pasang surut per jam seperti ditunjukkan pada Gambar 2.

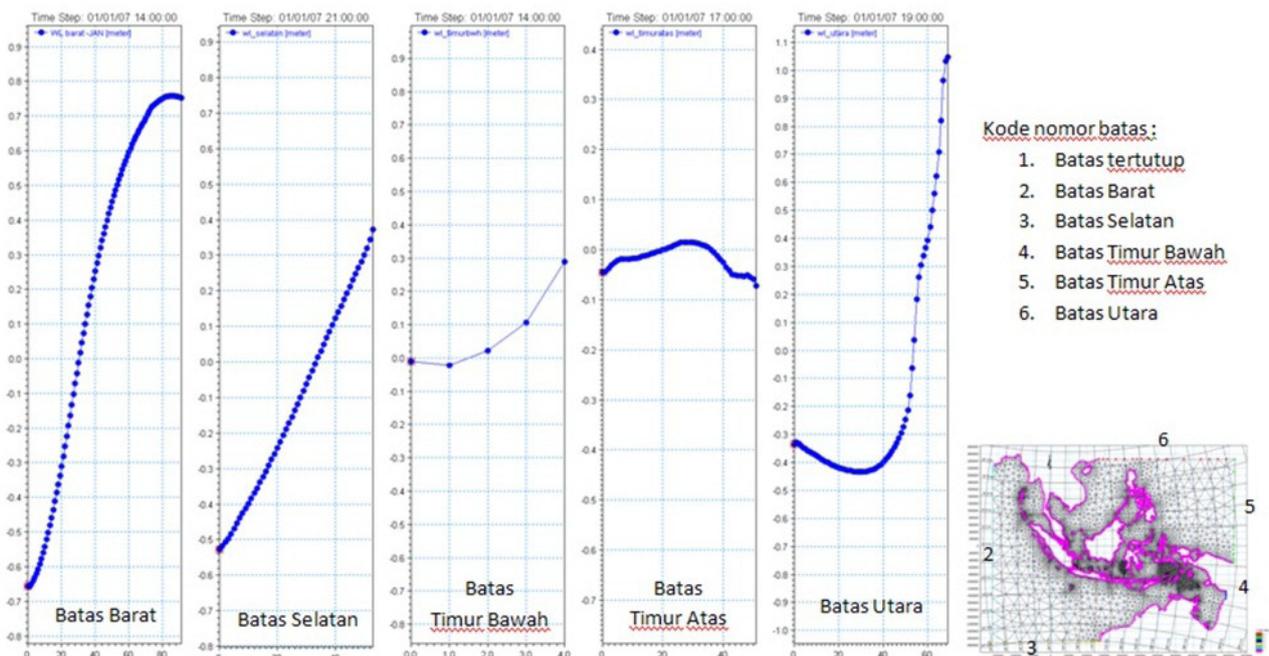
Pembuatan domain model diakhiri dengan meng-

input batimetri. Sehingga domain model terbentuk berupa ruang perairan tiga dimensi. Batimetri diinterpolasi terhadap grid yang sudah dibuat. Domain model dan hasil interpolasi ditunjukkan pada Gambar 3.

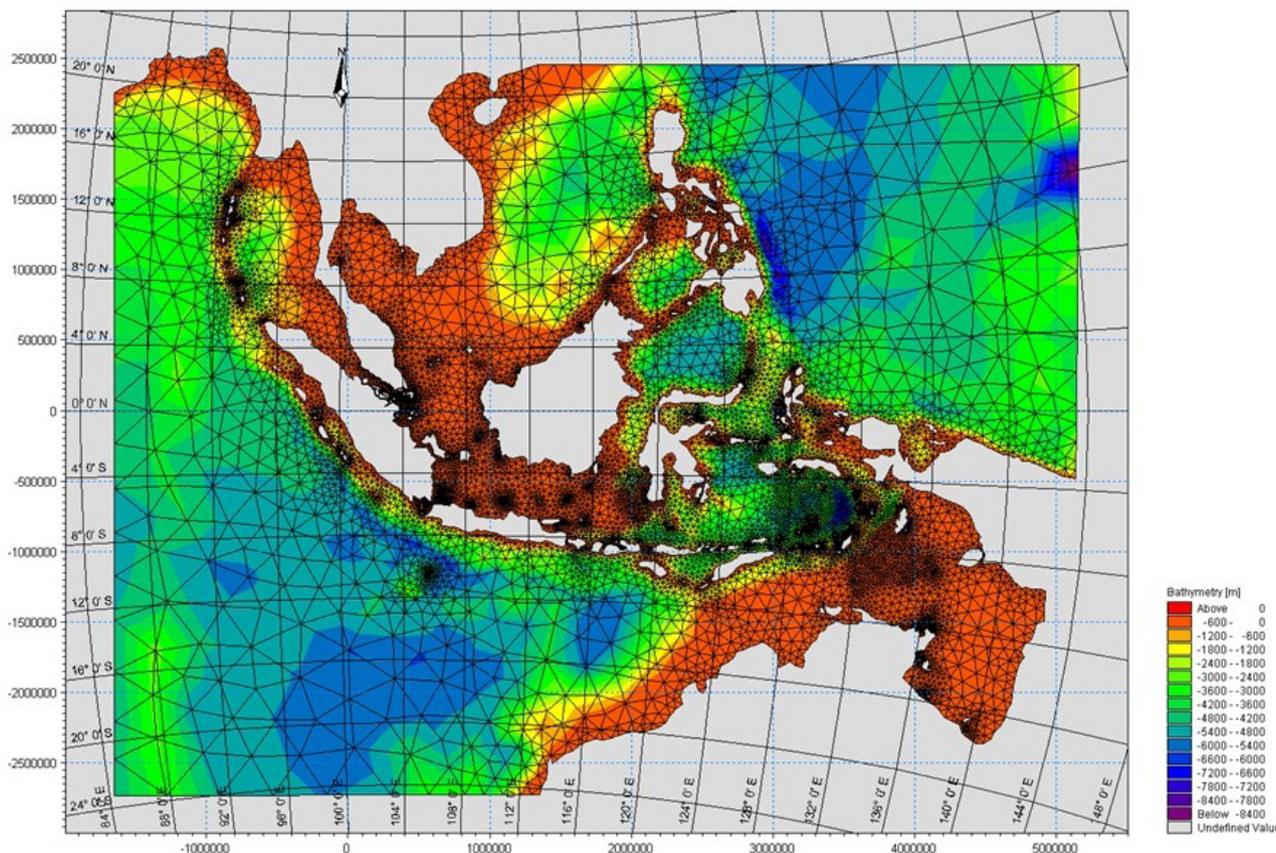
Data angin per enam jam dan data tekanan permukaan laut digunakan di seluruh permukaan domain model dan sepanjang waktu simulasi. Data angin rata-rata pada Januari, April, Agustus dan Oktober 2007 ditunjukkan pada Gambar 4. Pengolahan data angin dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak dan modul panduan yang dikembangkan oleh Setiawan (2007).

Hasil simulasi berupa arus tiga dimensi dan elevasi tiap jam selama waktu simulasi di setiap lapisan domain model. Arus terdiri dari tiga komponen yaitu u dan v mewakili arus horisontal dan w mewakili arus vertikal. Agar dapat memetakan fenomena *upwelling* bulanan, maka dilakukan perata-rataan komponen arus vertikal (w). Perata-rataan ini meliputi perata-rataan komponen w sepanjang waktu simulasi dan sepanjang kolom air.

Arus vertikal (w) memiliki nilai positif dan negatif. Komponen arus w positif berarti arah arus ke atas, yang dikenal dengan *upwelling*. Komponen arus w negatif berarti arah arus ke bawah, yang dikenal dengan *downwelling*. Selanjutnya, dilakukan pemetaan arus vertikal bernilai positif ($w \geq 0$). Sehingga, peta *upwelling* rata-rata untuk setiap bulan diperoleh yaitu Januari, April, Agustus dan Oktober 2007.



Gambar 2. Gridding dan input data pasang surut sebagai syarat batas terbuka domain model.



Gambar 3. Interpolasi batimetri domain model.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada umumnya pola arus yang dibangkitkan oleh pasang surut dan angin memperlihatkan bahwa pergerakan arus mengikuti pola pergerakan pasang surut (Gambar 5). Kecepatan arus pada waktu pasang purnama (*spring*) lebih besar dari pada waktu perbani (*neap*).

A. Pola angin musiman di perairan Indonesia

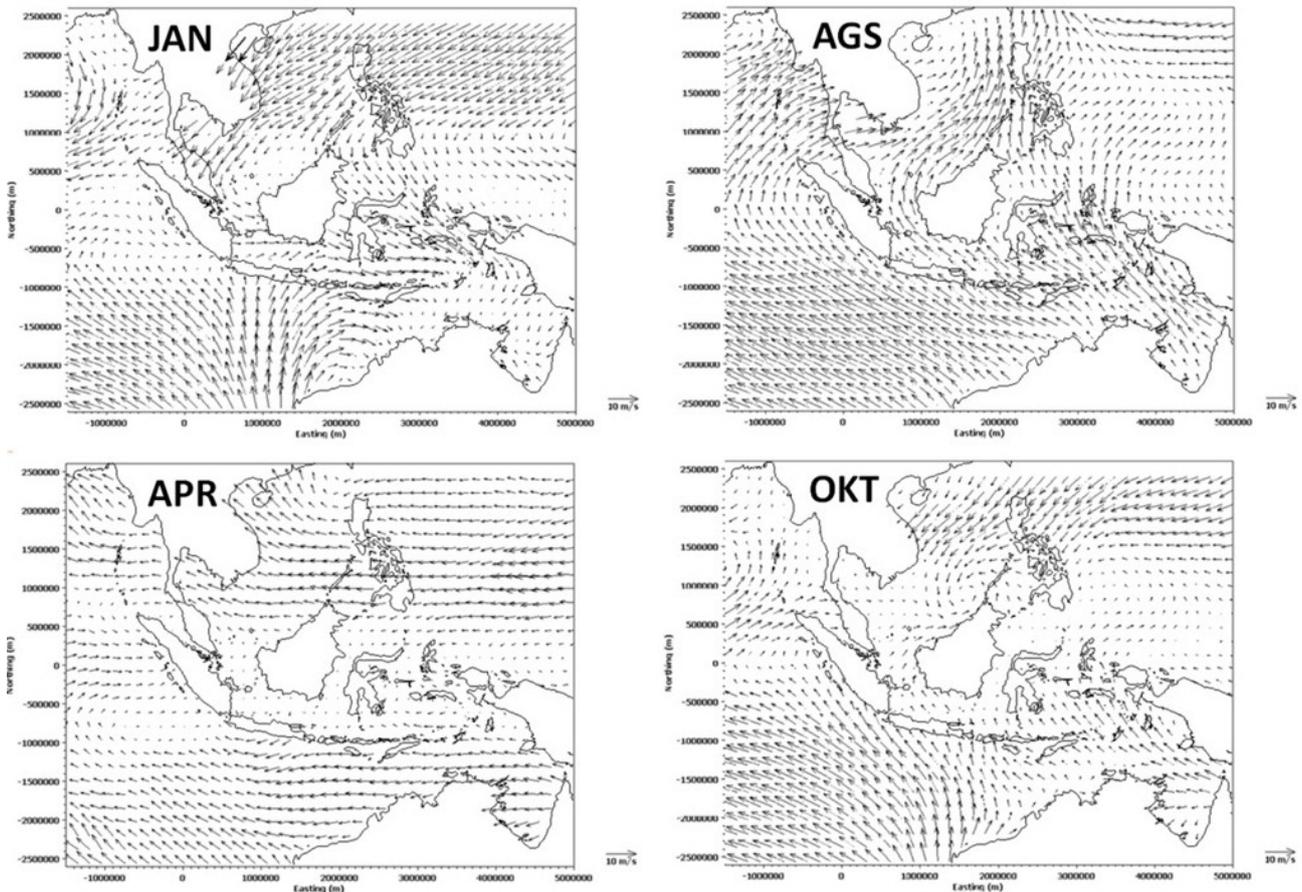
Pola pergerakan arus di perairan Indonesia sangat dipengaruhi oleh angin musim. Angin bertiup bergantian sepanjang tahun sebagai dampak dari perubahan musim yang terjadi di Benua Asia dan Benua Australia (Gambar 4). Pada Januari, angin bertiup dari timur laut, yaitu Samudera Pasifik, ke arah barat daya dan berbelok di Indonesia dari barat ke timur dan dikenal sebagai musim barat (Desember-Februari). Pada Agustus, angin bertiup dari tenggara, yaitu Australia, ke arah barat laut melewati Indonesia, dan berbelok ke arah timur laut di utara katulistiwa, yang dikenal sebagai Musim Timur (Juni-Agustus). Musim Barat ditandai oleh musim hujan dan kerasnya angin bertiup, sedangkan musim Timur ditandai oleh musim kemarau dan kecepatan angin cenderung melemah. Berbeda dengan dua musim utama, pada Maret-Mei dan September-November, arah kecepatan angin

berfluktuasi sehingga dinamakan musim transisi atau musim peralihan. Pada April (Musim Peralihan I), baik di utara maupun di selatan Indonesia, angin bergerak ke arah barat, dan di atas wilayah Indonesia angin menjadi melemah. Pada Oktober (Musim Peralihan II), angin dari timur laut, yaitu Samudera Pasifik, bergerak ke arah barat daya dan bertemu dengan angin yang berhembus dari tenggara, yaitu Australia ke arah barat laut. Sehingga pada wilayah Indonesia, angin ini menjadi melemah.

B. Pola Pergerakan Pasang Surut

Keluaran dari pemodelan arus barotropik 3D ini berupa arus horisontal (u,v), arus vertikal (w) dan elevasi setiap jam selama Januari, April, Agustus dan Oktober 2007. Bahan diskusi dalam pembahasan ini adalah cuplikan hasil simulasi tersebut, yaitu simulasi arus di perairan Indonesia saat Teluk Jakarta mengalami pasang surut purnama pada Oktober 2007 (Gambar 5).

Saat Teluk Jakarta menuju pasang, nampak elevasi Teluk Jakarta sampai perairan Belitung mendekati nol. Sementara itu, perairan di sekitarnya, yaitu utara Belitung dan selatan Kalimantan memiliki elevasi lebih tinggi. Pola arus horisontal di kedua perairan itu saling mendekati karena bergerak menuju



Gambar 4. Data angin rata-rata per bulan (2007), diolah berdasarkan dari data NCEP *Reanalysis*.

elevasi yang lebih rendah. Sementara itu, perairan di Indonesia timur (L. Flores, L. Banda, L. Sulawesi, Selat Makasar) sedang mengalami surut (berwarna biru).

Saat Teluk Jakarta pasang tertinggi, nampak elevasi Teluk Jakarta sampai perairan Belitung mencapai elevasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan perairan di selatan Kalimantan dan Laut Cina Selatan. Pola arus horisontal di Teluk Jakarta pun masih sama yaitu arus saling mendekati yang menyebabkan pengumpulan massa air hingga berelevasi lebih tinggi dari sekitarnya. Sementara Selat Makassar, L. Sulawesi dan Samudera Pasifik sedang mengalami pasang (berwarna hijau).

Saat Teluk Jakarta menuju surut, perairan Belitung masih pasang dan lebih tinggi elevasinya dibandingkan bagian utara dan bagian tenggara termasuk Teluk Jakarta. Arah arus menjauhi perairan Belitung yaitu ke bagian tenggara dan bagian utara yang memang menunjukkan elevasi lebih rendah (berwarna biru). Perairan lainnya di wilayah studi masih pasang kecuali L. Andaman dan barat daya Papua.

Saat Teluk Jakarta surut terendah, nampak elevasinya lebih rendah bersama dengan perairan

Belitung. Arah arus di utara Jakarta adalah ke barat karena perairan di timur Teluk Jakarta berelevasi lebih tinggi. Sementara itu perairan lainnya di Indonesia masih pasang dan Samudera Pasifik sudah surut.

C. Pola Arus vertikal Musiman sebagai Indikasi *upwelling* di Perairan Indonesia

Pengaruh angin dan pasang surut sangat menentukan besar dan arah arus secara horisontal. Sementara keadaan topografi sangat menentukan arah arus vertikal. Agar memudahkan mendeskripsikan *upwelling* musiman, maka nilai arus vertikal (w) dirata-ratakan setiap bulan sepanjang waktu simulasi dan sepanjang seluruh lapisan kolom air. Nilai positif hasil rata-rata tersebut kemudian dipetakan secara spasial sehingga diperoleh perbedaan kondisi *upwelling* tiap musim (Gambar 6).

Musim Barat (Januari 2007), *upwelling* di Perairan Indonesia bagian barat nampak minim. Sedangkan di bagian timur muncul *upwelling*. Di perairan Sumatera terhitung tidak ada *upwelling* kecuali di sekitar Pulau We dengan tingkat lemah sampai kuat. Di perairan sekitar Pulau Jawa terhitung tidak ada *upwelling*. Penelitian dari Susanto *et al.* (2001) melaporkan bahwa

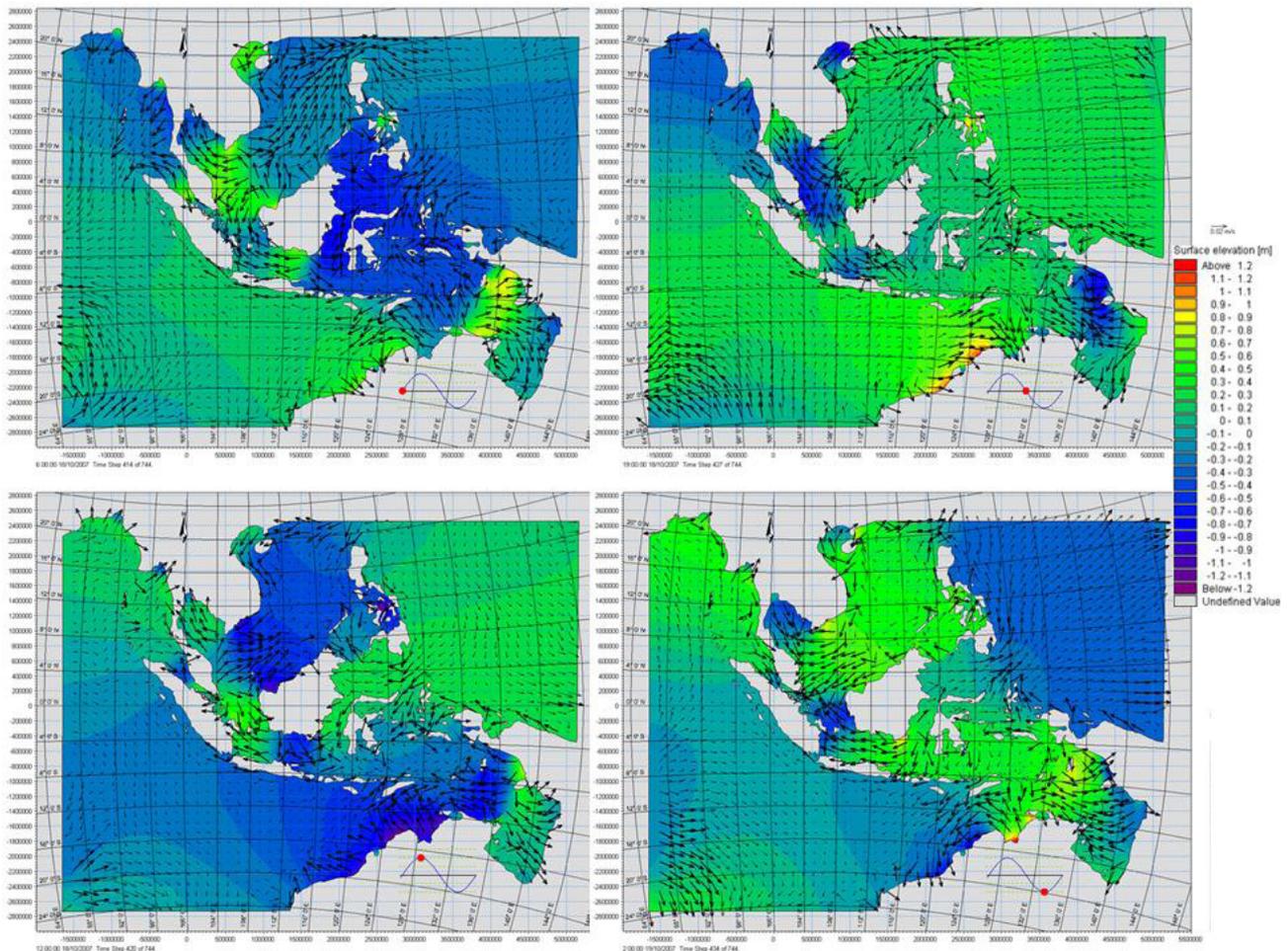
kondisi *upwelling* di sekitar pantai Jawa dan Sumatera dipengaruhi oleh kondisi angin lokal dan interaksi laut-atmosfer secara global yang berhubungan dengan ENSO. Sementara di sekitar Pulau Kalimantan hanya ada *upwelling* di perairan sebelah timur yaitu di Selat Ujung Pandang antara Teluk Sangkurilang sampai Tanjung Aru dengan tingkat lemah sampai kuat dan relatif luas. Di perairan sekitar Pulau Sulawesi, *upwelling* lemah sampai kuat dan relatif luas muncul di perairan Teluk Tomini bagian utara dan barat, Teluk Tolo sampai timur laut Pulau Butung dan Tanjung Pangkalang, timur Pulau Peleng, serta perairan Teluk Bone bagian barat. *Upwelling* juga muncul di sekitar Kepulauan Talaud dengan tingkat kuat namun sempit areanya.

Perairan sekitar Pulau Bali, *upwelling* dominan lemah ada di bagian utara, dan kuat di Selat Balung. *Upwelling* muncul dominan kuat di utara, barat dan selatan Pulau Lombok. *Upwelling* lemah sampai kuat terdapat di utara Pulau Sumbawa sampai Selat Sape. *Upwelling* dominan kuat juga muncul di utara Pulau Flores, Adonara, Siantar, Alor, Sumba, Timor.

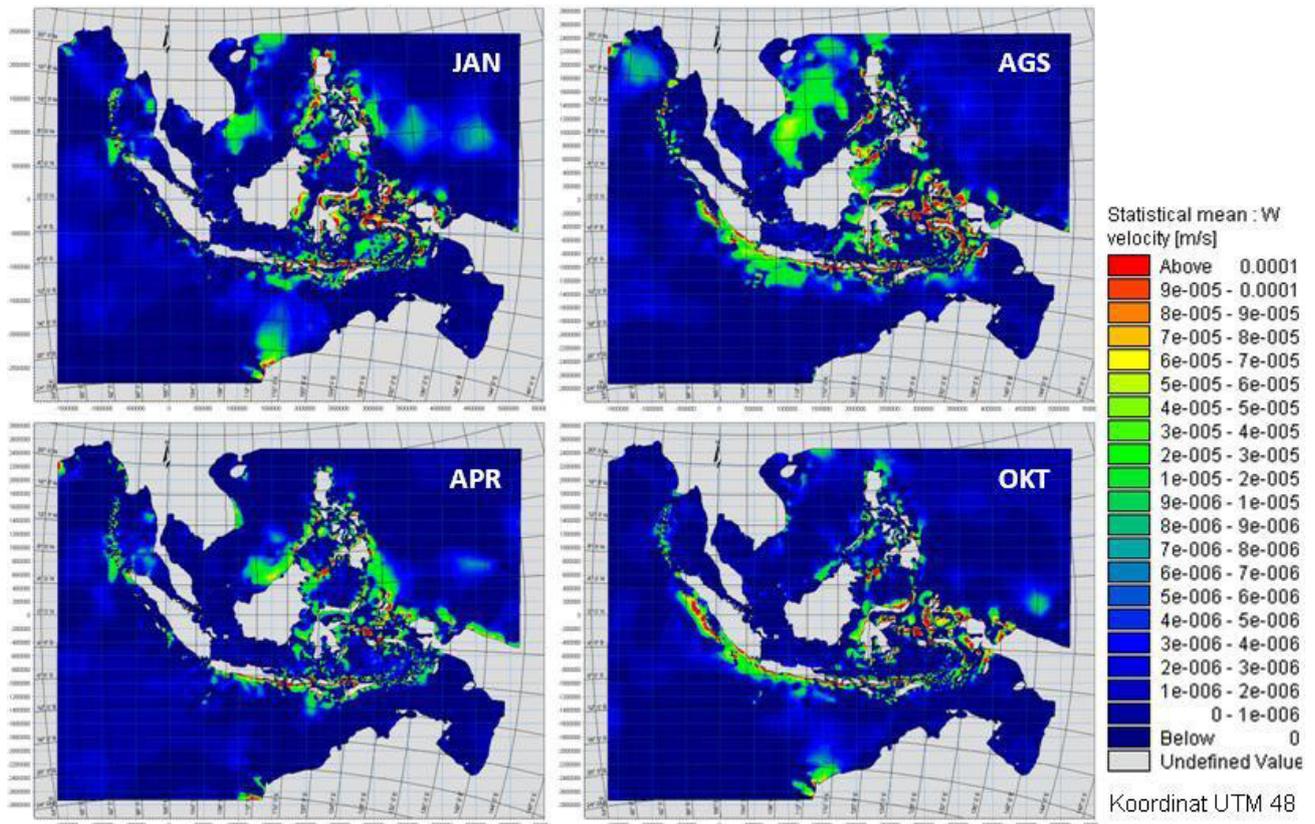
Upwelling lemah muncul di Laut Sawu dengan area relatif luas sampai di perairan sekitar Pulau Roti dan Pulau Sawu.

Laut Banda terlihat *upwelling* lemah dengan area luas. Sementara di pulau sekitarnya, *upwelling* muncul di utara Pulau Wetar dengan tingkat kuat dan relatif sempit. Selain itu, *upwelling* cukup luas berada di sekitar Kepulauan Kai. *Upwelling* dominan kuat dan luas ada di Laut Seram sekitar timur laut Pulau Seram sampai tenggara Kepulauan Sula, serta utara dan timur laut Pulau Buru. Di utara Kepulauan Sula juga muncul *upwelling* yang meluas sampai perairan Bitung. Di sekitar Halmahera, *upwelling* kuat dan luas muncul di timur dan selatan, yaitu tepatnya di Teluk Weda, Teluk Bull sampai sekitar Tanjung Perak.

Pada perairan Pulau Irian Jaya, *upwelling* dominan kuat ada di barat Teluk Cenderawasih sekitar Manokwari. *Upwelling* juga muncul di sekitar Pulau Waigeo, yaitu sebelah timur dengan tingkat kuat, dan bagian barat dengan tingkat dominan lemah.



Gambar 5. Contoh simulasi arus horisontal rata-rata (anak panah) dan elevasi permukaan laut (warna) pada Oktober 2007 saat Teluk Jakarta akan pasang (kiri atas), pasang tertinggi (kiri bawah), akan surut (kanan atas), surut terendah (kanan bawah) kondisi purnama.



Gambar 6. Peta *upwelling* rata-rata pada 2007 hasil pemodelan per Januari (kiri atas), April (kiri bawah), Agustus (kanan atas) dan Oktober (kanan bawah).

Musim Peralihan I (April 2007), terjadi perubahan yaitu selatan Jawa mulai ada *upwelling* dengan tingkat kuat dan dominan lemah dan area relatif luas. Sementara, di sekitar Sumatera tidak ada *upwelling* kecuali di barat Daerah Istimewa Aceh dengan tingkat dominan lemah. Di perairan kawasan Timur Indonesia kemunculan *upwelling* menjadi berkurang dibandingkan dengan Musim Barat.

Di perairan sekitar Kalimantan, *upwelling* terhitung tidak ada, hanya muncul lemah di tengah Selat Makassar. Sementara di sekitar Sulawesi, *upwelling* umumnya lemah, yaitu di Teluk Tomini bagian utara dan Teluk Tolo. Sementara di Kepulauan Talaud, *upwelling* dominan lemah juga muncul. *Upwelling* kuat muncul antara Pulau Peleng dan Pulau Taliabu, dan antara Pulau Wowoni dan Pulau Butung. *Upwelling* di sekitar Bali dan Nusa Tenggara, pada Musim Barat, banyak yang muncul di sebelah selatan. *Upwelling* kuat muncul di selatan Pulau Bali dengan area luas. Area *upwelling* yang luas di sekitar perairan ini juga menguatkan hasil penelitian yang menyatakan bahwa perairan laut selatan NTB hingga Jawa Timur memiliki produktivitas primer yang tinggi dan sangat potensial sebagai daerah *fishing effort*, mengingat di lokasi ini mengalami *upwelling* yang paling lama periodenya dan paling tinggi intensitasnya (Kunarso, 2005; Kemili, 2012). Lalu muncul pula *upwelling* lemah sampai kuat

di barat dan selatan Pulau Lombok, Pulau Sumbawa sampai Selat Sape, selatan Pulau Flores, Sumba dan Timor. *Upwelling* dominan kuat muncul di utara dan selatan Pulau Adonara, Siantar dan Alor.

Di sekitar Laut Banda, *upwelling* terlihat tidak muncul, hanya ada di pulau-pulau di sekitarnya dengan tingkat lemah dan sempit. *Upwelling* lemah yang luas ada di antara Pulau Yamdena dan Kepulauan Aru. *Upwelling* kuat dan relatif luas muncul di antara Pulau Buru dan Pulau Seram, serta di utara dan selatan Kepulauan Sula. Di sekitar Pulau Halmahera muncul *upwelling* di timur, yaitu sekitar Tanjung Perak dengan tingkat kuat dan luas. Sementara, di Teluk Weda muncul *upwelling* dominan lemah dengan area luas. Kemunculan *upwelling* juga terlihat di timur laut Pulau Morotai.

Di perairan Irian Jaya, tingkat *upwelling* juga lemah yang kemunculannya ada di antara Pulau Misol dan Pulau Seram, di sekitar Pulau Waigeo sampai Sorong, yaitu di Selat Dampit. *Upwelling* lemah juga muncul di utara Pulau Biak dan di utara Tanjung Darwilis sampai utara Jayapura.

Musim Timur (Agustus 2007) terjadi perubahan keadaan *upwelling* dibandingkan dengan musim sebelumnya yaitu Musim Peralihan I. Di selatan Jawa

terlihat *upwelling* dominan lemah yang lebih luas mencapai Samudera Hindia, sementara tingkat kuat hanya ada di sekitar pesisir selatan Jawa. *Upwelling* lemah sampai kuat ini juga meluas sampai perairan di barat Lampung dan menerus sampai barat Sumatera Barat tepatnya di Teluk Bayur. Kemunculan *upwelling* lemah sampai kuat juga meluas dari sekitar Pulau Enggano sampai barat Kepulauan Pagai, Pulau Sipora dan Pulau Siberut serta Kepulauan Batu. Di perairan antara Kalimantan dan Sulawesi muncul *upwelling* lemah yang relatif luas. Sementara, di sekitar Pulau Sulawesi muncul *upwelling* lemah sampai kuat relatif luas di utara Sulawesi utara, yaitu di Laut Sulawesi tepatnya di antara Tanjung Kandi sampai Teluk Amurang. *Upwelling* kuat ada di timur Kepulauan Talaud. Di Teluk Tomini, muncul *upwelling* dominan kuat dan luas dari utara Tanjung Pangkalsiang sampai Teluk Poso. Di Sulawesi Tenggara, *upwelling* dominan kuat muncul di timur Pulau Wowoni sampai Tanjung Butung, juga ada di selatan Pulau Butung dan Pulau Muna. *Upwelling* relatif lemah dan luas ada di Teluk Bone. *Upwelling* kuat dan luas ada di utara, barat dan selatan Pulau Salayar.

Di Bali dan Nusa Tenggara, *upwelling* dominan kuat muncul di selatan Pulau Bali, selatan dan barat Pulau Lombok, selatan Pulau Sumbawa sampai Selat Sape. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian dari Ningsih (2013) dengan menggunakan data temperatur dan klorofil dari data satelit yang melaporkan bahwa *upwelling* di sekitar perairan selatan Bali dan Nusa Tenggara kuat terjadi pada periode Juni-Oktober. *Upwelling* kuat juga muncul di selatan Pulau Flores, Sumba, Sawu, Roti, Timor, utara dan selatan Pulau Adonara, Siantar dan Alor. Kemunculan *Upwelling* pada musim timur di Laut Sawu ini sesuai dengan hasil pengamatan INSTANT Cruise oleh Puti *et al.* (2006). *Upwelling* di Laut Banda muncul di selatan Pulau Wetar dan di sekitar Kepulauan Banda. *Upwelling* kuat dan luas ada di antara Kepulauan Kai sampai Pulau Seram. Selain itu, di barat Pulau Yamdena muncul *upwelling* kuat yang luas. Di sekitar Pulau Seram baik utara, barat dan selatan terlihat ada *upwelling* kuat yang luas, dan juga ada di selatan Pulau Buru. *Upwelling* kuat juga meluas dari Pulau Seram sampai Pulau Misol. *Upwelling* kuat muncul pula di selatan dan utara Kepulauan Sula meluas ke barat Kepulauan Obi dan barat Pulau Kasiruta. *Upwelling* kuat juga meluas dari tenggara Pulau Halmahera sampai Pulau Misol. Sekitar Pulau Halmahera terlihat *upwelling* kuat dan luas di Teluk Bull Sampai Tanjung Perak menerus sampai selatan Selat Morotai. *Upwelling* kuat juga muncul di perairan antara Pulau Waigeo dan Pulau Halmahera.

Pada wilayah Irian Jaya, *upwelling* kuat muncul di utara Pulau Waigeo sampai utara Sorong. *Upwelling* lemah sampai kuat muncul di barat Fakfak sampai

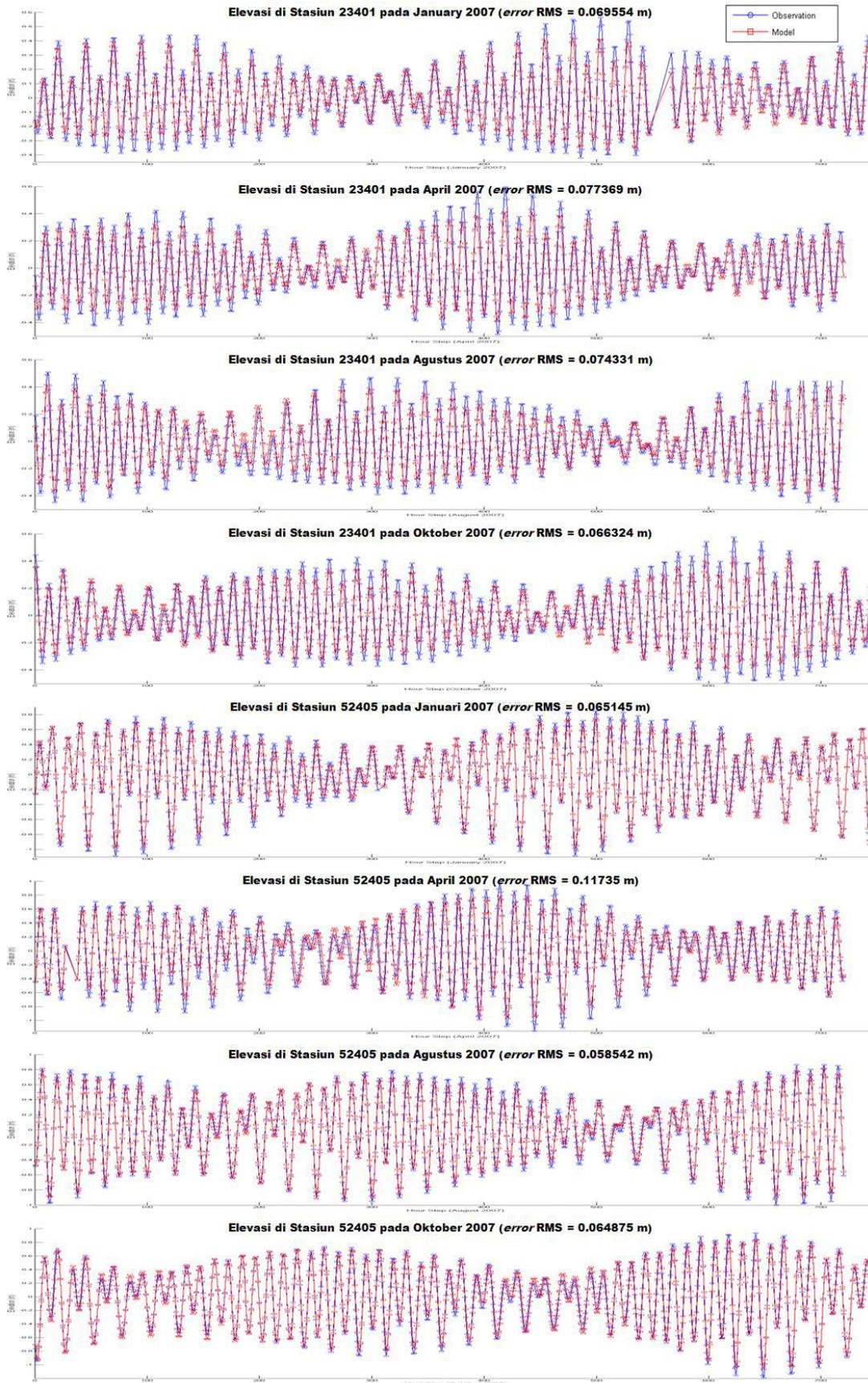
Tanjung Papisol. *Upwelling* lemah ada di Teluk Cenderawasih, utara Pulau Biak dan utara Pulau Yapen.

Pada Musim Peralihan II (Oktober 2007), *upwelling* lemah sampai kuat muncul di selatan Jawa, namun tidak seluas Musim Timur. Sedangkan *upwelling* di barat Sumatera semakin meluas ke utara. *Upwelling* lemah sampai kuat muncul dari selatan Jawa sampai barat Sumatera Barat, tepatnya barat Teluk Bayur. Selain itu, *upwelling* juga meluas dari perairan sekitar Pulau Enggano, barat Kepulauan Mentawai, Kepulauan Batu, Pulau Nias dan Pulau Simeulue. Bersesuaian dengan hasil yang diperoleh Kunarso (2005) yang menyatakan bahwa *upwelling* di barat Kepulauan Mentawai terjadi secara periodik pada pergantian musim Timur ke Barat hingga Musim Barat saat kondisi normal dan El Niño. Sementara di sekitar Kalimantan terlihat tidak ada *upwelling*.

Di perairan sekitar Sulawesi, *upwelling* lemah dominan kuat muncul di utara Sulawesi Utara tepatnya antara Tanjung Kandi sampai Teluk Amurang. *Upwelling* kuat muncul pula di Kepulauan Talaud. Sementara di Selat Makassar muncul *upwelling* dominan lemah di barat Sulawesi menguat mendekati daratan. *Upwelling* kuat muncul di Teluk Tomini bagian selatan antara Tanjung Pangkalsiang sampai Teluk Poso. *Upwelling* kuat masih muncul di timur antara Pulau Wowoni dan Butung. Selain itu, muncul pula *upwelling* di selatan Pulau Butung dan Kabaena. *Upwelling* lemah dominan kuat muncul di Selat Selayar. Di Teluk Bone muncul *upwelling* lemah sampai kuat yang relatif sempit di barat Tanjung Ponopono.

Upwelling masih muncul dominan kuat dan luas di selatan Pulau Bali dan Lombok. Sementara *upwelling* lemah sampai kuat muncul di selatan Pulau Sumbawa, Selat Sopo, selatan Pulau Flores, utara dan selatan Pulau Andonara sampai Alor., Di utara Pulau Timor, *upwelling* sangat lemah. Sementara di Laut Banda minim sekali kemunculan *upwelling*, yang nampak dominan adalah di antara Kepulauan Kai dan Pulau Seram. Di selatan Pulau Seram muncul *upwelling* lemah sampai kuat. Sementara di antara Pulau Buru dan Seram ada *upwelling* yang kuat. *Upwelling* kuat juga muncul di utara dan selatan Kepulauan Sula. *Upwelling* dominan kuat dan relatif luas ada di selatan Kepulauan Obi sampai barat Pulau Halmahera. *Upwelling* luas dan dominan lemah ada di antara Pulau Halmahera dan Pulau Misol.

Di Irian Jaya, ada *upwelling* yang relatif luas dari tingkat lemah sampai kuat. Kemunculannya antara Kepala Burung sampai utara Pulau Waigeo menerus sampai perairan antara Pulau Waigeo dan Pulau Halmahera. Selain itu, muncul juga *upwelling* lemah sampai kuat di utara Fakfak meluas sampai



Gambar 7. Elevasi observasi dan model selama Januari, April, Agustus dan Oktober 2007 pada Stasiun DART 23401 dan 52405.

Tabel 1. Galat RMS elevasi observasi dan elevasi simulasi

Bulan	Stasiun 23401	Stasiun 52405
Januari 2007	0,069554	0,065145
April 2007	0,077369	0,117350
Agustus 2007	0,074331	0,058542
Oktober 2007	0,066324	0,064875

selatan Tanjung Papisol, juga ada di selatan Pulau Adi, dan di antara Kepulauan Aru dan Tanjung Namaripi. *Upwelling* lemah sampai kuat dan relatif luas muncul di perairan Cenderawasih, di selatan Pulau Yapen dan antara Tanjung Darwilis dan Pulau Biak, serta timur laut Pulau Biak.

Validasi

Validasi dilakukan dengan data observasi yang diperoleh dari DART (*National Data Buoy Center, National Oceanic and Atmospheric Administration*). Ada beberapa stasiun pengamatan di domain model, namun hanya dua stasiun yang memiliki time series yang sama dengan waktu simulasi, yaitu Stasiun 23401 dan 52405. Stasiun 23401 berada di posisi 88.54°BT, 8.905°LU dimiliki oleh *Thailand Meteorological Department* (TMD). Stasiun 52405 berada di posisi 132.333°BT, 12.881°LU, dimiliki oleh *National Data Buoy Center*.

Hasil validasi ditunjukkan oleh Tabel 1 dan Gambar 7. Validasi ini menunjukkan bahwa elevasi model sudah mendekati elevasi observasi, dengan galat RMS elevasi relatif kecil (Pranowo *et al.*, 2010), yaitu antara $5,8542 \times 10^{-2} \text{ m} - 1,1735 \times 10^{-1} \text{ m}$. Ini berarti kesalahan elevasi model rata-rata terhadap elevasi observasi tidak lebih dari 11,735 cm.

KESIMPULAN

Pola arus barotropik 3 dimensi dengan metode *finite volume*, konsistensinya semakin baik di daerah perairan terbuka, jauh dari pantai. Pola arus hasil simulasi dapat menggambarkan eksistensi *Halmahera Eddy, Mindanao Eddy, South Java Current, Coastal Kelvin current*, dan Arus Lintas Indonesia. Validasi elevasi muka laut terhadap DART *mooring buoy* menunjukkan hasil yang memuaskan (Galat RMS elevasi $5,8542 \times 10^{-2} \text{ m} - 1,1735 \times 10^{-1} \text{ m}$). *Upwelling* pada Musim Barat terjadi di Indonesia Timur (perairan Busur Banda, Laut Maluku, Laut Seram, Selat Makassar, Teluk Tomini, Teluk Tolo, dan Teluk Bone). *Upwelling* mulai muncul di selatan Jawa, pada Musim Peralihan I sedangkan di Indonesia Timur menjadi berkurang. Pada Musim Timur, *upwelling* mulai muncul dari selatan Jawa sampai barat Sumatera Barat dan menguat di Indonesia Timur. Pada Musim Peralihan II

upwelling meluas ke arah barat sampai perairan Pulau Simeuleu, sedangkan di Indonesia Timur berkurang dibandingkan Musim Timur.

Pola arus barotropik 3D dengan metode *finite volume* dapat menggambarkan kondisi arus di perairan terbuka dengan baik dan sedikit kesalahan. Peningkatan akurasi keakuratan hasil pemodelan dapat dilakukan dengan menambahkan parameter temperatur dan densitas dalam *input* model. Lokasi *upwelling* yang telah diperoleh dari hasil pemodelan ini dapat digunakan sebagai acuan dalam membuat peta lokasi *fishing ground* di Indonesia.

PERSANTUNAN

Penelitian ini didanai APBN DIPA TA. 2010 pada Pusat Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Laut dan Pesisir. Penyusunan dan penerbitan manuskrip artikel ini didanai dari sumber yang sama untuk kegiatan “Kajian Perubahan Monsun di Perairan Indonesia (MOMSEI)” TA 2013. Manuskrip artikel ini telah dipresentasikan pada PIT-X ISOI November 2013. Para penulis mengucapkan terima kasih kepada para mentor pemodelan numerik hidrodinamika: Dr. Eng. Nining Sari Ningsih (ITB) dan Dr.rer.nat. Agus Setiawan (BPOL, Badan Litbang KP).

DAFTAR PUSTAKA

- Bowden, K.F. (1983). *Physical Oceanography of Coastal Waters*. E. Horwood Series in Marine Science, Halsted Press, New York, 302 pp.
- Bowden, K.F, & Ferguson, S.R. (1980). Variations with height of turbulence in a tidally-induced bottom boundary layer. In: J.C.J. Nihoul (Editor), *Marine Turbulence*, Elsevier, Amsterdam, p. 259-286.
- Cole, J., & McGlade, J. (1998). Clupeoid population variability, environment & satellite imagery in coastal upwelling systems. *Rev. Fish Biol.* Fish. Vol. 8, p. 445-471.
- DHI. (2007). *Hydrodynamic Module*, Scientific Documentation, 58 pp.
- Egbert, G.D., & Erofeeva, S. Y. (2002). *Efficient Inverse*

- Modeling of Barotropic Ocean Tides, *Am. Met. Soc.* (19): 183-204.
- Ihsan, Pemodelan Konseptual Upwelling terhadap target spesies ikan dan teknologi penangkapan ikan. (2013). Dalam <http://ptmadanimultikreasi.com>. Pada tanggal 8 juni 2015, jam 11.28 WIB.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woolwn, J., Zhu, Y., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K.C., Ropelewski, C., Wang, J., Leetma, A., Reynold, R., Jenne, R. & Joseph, D. (1996). The NCEP/NCAR 40-year Reanalysis Project, *Bull. Am. Met. Soc.*, 77(3), 437-471.
- Kemili, P. & Putri, M. R. (2012). Pengaruh Durasi dan Intensitas Upwelling Berdasarkan Anomali Suhu Permukaan Laut terhadap Variabilitas Produktivitas Primer di Perairan Indonesia. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, Vol. 4(1):66-79.
- Kunarso, Hadi, S. & Ningsih, N. S. (2005). Kajian Lokasi Upwelling untuk Penentuan Fishing Ground Potensial Ikan Tuna. *Jurnal Ilmu Kelautan*, Vol.10(2):61-67.
- Liu, C. C. & Jin, Q. (1995). Artificial Upwelling in Regular and Random Waves. *Ocean Engineering Journal*. 22(4):337-350
- Ningsih, N.S., N. Rakhmaputeri & Harto, A.B. (2013). Upwelling Variability along the Southern Coast of Bali and in Nusa Tenggara Waters. *Ocean Science Journal*, 48(1):49-57.
- Penven, P., Roy, C., Brundrit, G. B., Verdiere, A. C., Freon, P., Johnson, A. S., Lutjeharms, J. R. E., & Shilington, F.A. (2001). A Regional Hydrodynamic Model of Upwelling in the Southern Benguela. *South African Journal of Science* 97:1-4.
- Pranowo, W.S., Dewi, L. C., Mustikasari, E. & Subki, B. A. (2010). Verification the model which using by the Government of Indonesia for oil spill model simulation - The claim document of October 2010. Suppl. *Technical Report*. Negotiation meeting between Gol & PTTEP AA (Montara), Singapore, December 17-19, 2010, 8 pp.
- Puti, C., Hadi, S. & Pranowo, W. S. (2006). Study variability of thermocline layer and its relationship with the sea surface chlorophyll-a blooming condition in Ombai Strait and Savu Sea. *Proceed. Workshop INSTANT*, 12 September 2006, Jakarta.
- Setiawan, A., Fitria Maharani, I., Riandini, F., (2007). Modul Pelatihan Penggunaan Software Pengolahan Data Oseanografi, Institut Teknologi Bandung. Bandung.
- Sunarto, (2008). Peranan Upwelling terhadap Pembentukan Daerah Penangkapan Ikan. *Karya Ilmiah*. Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan. Universitas Padjadjaran. Bandung.
- Susanto, R. D., Gordon, A. L. & Zheng, Q. (2001). Upwelling along the coasts of Java and Sumatra and its Relation to ENSO. *Geophysical Research Letters*. 28(8):1599-1602
- Simbolon, D.F. & Tadjuddah. T. (2008). Pendugaan Front dan *upwelling* melalui Interpretasi Citra suhu permukaan laut dan Clorofil-a di Perairan Wakatobi Sulewesi Tenggara. *Bulletin PSP. Jurnal Ilmiah Teknologi dan Manajemen Perikanan Tangkap*. Diterbitkan atas kerjasama Forum Komunikasi Kemitraan Perikanan Tangkap (FK2PT) dan Departemen Pemanfaatan Sumberdaya Perikanan Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan. IPB Volume XVII.No.3 Hal.297-384. Desember 2008.